

혼화재료를 치환한 시멘트 계열 재료에 대한 저점도형 고성능 감수제의 유동 성능 평가

Fluidity Performance Evaluation of Low Viscosity Typed Superplasticizer for Cement-Based Materials Incorporating Supplementary Cementitious Materials

손 배 근¹

이 향 선¹

이 유 정¹

한 동 엽^{2*}

Son, Bae-Geun¹

Lee, Hyang-Seon¹

Lee, You-Jeong¹

Han, Dong-Yeop^{2*}

Master Student, Department of Architectural Engineering, Gyeongsang National University, Jinju, 52828, Korea ¹
Assistant Professor, Department of Architectural Engineering, and Engineering Research Institute, Gyeongsang National University, Jinju, 52828 Korea ²

Abstract

The aim of the research is to provide a fundamental data of low viscosity typed superplasticizer (SP) on cement-based materials incorporating various supplementary cementitious materials (SCMs). As a relatively new product, low-viscosity typed SP has introduced for high performance concrete with high viscosity due to its high solid volume fraction with various SCMs. However, there are not enough research or reports on the performance of the low viscosity typed SP with cement-based materials incorporating SCMs. hence, in this research, for cement paste and mortar, fluidity and rheological properties were evaluated when the mixtures contained various SCMs such as fly ash, blast furnace slag, and silica fume. From the experiment conducted, it was checked that the low viscosity typed superplasticizer decreased the plastic viscosity of the mixture as well as the yield stress. From the results of this research, it is expected to contribute on introduction of new type SP for high performance concrete or high-viscous cementitious materials.

Keywords : rheology, plastic viscosity, yield stress, low viscosity typed SP, SCMs

1. 서 론

1.1 연구의 목적

최근 건설 산업에서 고층화 및 고성능화에 의해 콘크리트의 고성능화는 필수적이며 이러한 성능을 발휘하기 위하여 많은 연구가 이루어지고 있다[1-3]. 콘크리트의 고성능화를 위해서는 기본적으로 콘크리트의 물-시멘트비를 낮추거나 산업부산물을 치환하여 콘크리트의 고성능화를 달

성하게 된다[4]. 이러한 콘크리트의 고성능화를 위한 낮은 물결합재비 및 혼화재료 치환은 높은 분체량 따라 콘크리트의 유동성은 현저히 떨어지게 된다[5]. 이러한 단점을 보완하기 위해 사용하는 혼화재료가 고성능 감수제이다. 콘크리트의 낮은 유동성은 레올로지적인 관점에서, 높은 항복응력 및 소성 점도로 표현할 수 있다. 이 중에서 소성점도 증가는 Coussot[6]의 정리에서 유체가 흐를 수 있는 공간을 입자들이 채우는 원리에 기인하며 항복응력의 증가는 Nehdi et al.[7]의 정리와 같이 물이 감싸야 하는 입자들의 면적이 커짐에 기인한다. 다만 고성능 감수제의 경우 분산작용에 의한 유동성 증진효과[8-10]가 있으므로 항복치저감에 영향이 있지만, 여전히 많은 입자들이 존재하므로 소성점도는 여전히 높은 상태를 유지한다[11]. 즉, 고성능

Received : February 21, 2019

Revision received : May 2, 2019

Accepted : May 31, 2019

* Corresponding author : Han, Dong-Yeop

[Tel: 82-55-772-1758, E-mail: donald.dyhan@gnu.ac.kr]

©2019 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

감수제를 사용하더라도 높은 소성점도에 의해 작업성이 떨어지게 된다[12]. 이러한 기존의 고성능 감수제의 단점을 보완하기 위해 개발된 화학혼화제가 저점도형 고성능 감수제이며 이 저점도형 고성능 감수제를 활용한 콘크리트의 물성에 관한 연구는 아직 많지 않은 실정이다. 특히, 고성능 콘크리트 배합의 특징인 다양한 치환분체 조건에서 저점도형 고성능 감수제의 성능에 대한 연구는 많이 부족한 상황이다.

이에 본 연구에서는 고성능 콘크리트를 상징한 시멘트 페이스트 및 모르타르 배합에 대하여 기존의 고성능 감수제와 저점도형 고성능 감수제의 함유량 변화와 더불어 대표적인 혼화재료를 치환 배합에 대해 고성능 감수제와 저점도형 고성능 감수제의 함유량 변화에 따른 기본적인 유동성능 및 강도성능에 대해 평가하고자 한다. 본 연구의 결과를 통해 비교적 새로운 재료인 저점도형 고성능 감수제가 일반적인 고성능 감수제와 비교하여 다양한 환경의 콘크리트 배합에서 발휘하는 성능에 대한 기초 자료를 제시하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구는 저점도형 고성능감수제의 성능을 혼화재료의 유무 조건과 동시에 판단하기 위하여 다음의 Table 1, 2와 같이 실험을 계획하였다. 저점도형 고성능 감수제의 기본적인 성능을 확인하는 첫 번째 실험 (Step 1)의 경우는 Table 1에 정리된 바와 같이 시멘트 페이스트와 모르타르의 두 가지 형태를 준비하였다. 또한, 저점도형 고성능 감수제의 성능을 비교 분석하기 위하여 일반적으로 사용되는 고성능 감수제를 동일한 조건에서 실험하도록 계획하였다. 시멘트 페이스트 및 모르타르의 배합사항에 대해서는 저점도형 고성능 감수제가 기본적으로 점도를 낮추는 형태의 감수제 작용이며 주로 고성능 시멘트 계열 재료를 대상으로 개발된 재료이므로 시멘트 페이스트와 모르타르 모두 비교적 낮은 0.35의 물-결합재비로 고정하였으며 모르타르의 시멘트-잔골재비는 0.7로 고정하였다. 저점도형 고성능 감수제의 성능 비교를 위해 0.2%에서 1.2%까지 다양한 함유량을 계획하여 함유량 변화에 따른 성능 분석을 계획하였다. 다음으로 혼화재료 사용에 따른 저점도형 고성능 감수제의 성능을 파악하기 위한 실험 (Step 2)의 경우도 시멘트 페이스트와 모르타르에 대해 실험을 진행하였으며 Table 2에서 보는 바와 같이 이전 실험과 동일한 물-결합재비와 시멘트-잔골재비로 고정하였다. 치환분체 사용조건에 따른 저점도형 고성능 감수제의 성능을 파악하기 위해 주로 사용되는 플라이애시, 고로슬래그, 및 실리카흄을 준비하고, 이들 혼화재료의 치환율을 일반적인 수준인 10%로 고정하였다. 성능 평가를 위한 저점도형 고성능 감수제의 함유량은 0.4, 0.8, 1.2%의 3가지 함유량을 계획하였다.

시험 사항으로 저점도형 감수제 함유에 따른 시멘트 페이스트 및 모르타르의 유동 특성을 확인하기 위해 플로 시험을 계획하였고 레오미터를 이용하여 플로 커브를 도출해 시멘트 페이스트의 소성점도와 항복응력을 측정하고자 하였다. 다만, 모르타르의 경우 레오미터를 이용한 측정이 부정확하여 채널플로를 사용하여 소정의 계산식을 이용해 소성점도 및 항복응력의 값을 도출하였다.

Table 1. Experimental plan for low viscosity typed superplasticizer performance without SCMs (Step 1)

Phase	cement paste	mortar
W/B	0.35	
C : S	-	1 : 0.7
Superplasticizer	Type Polycarboxylate-based SP, low-viscosity type SP	
	Dosage(%) 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 1, 1.2	
Test	Modified-mini slump Flow curve (yield stress, viscosity)	

Table 2. Experimental plan for low viscosity typed superplasticizer performance with SCMs (Step 2)

Phase	Cement paste	Mortar
W/B	0.35	
C : S	-	1 : 0.7
SCMs	Type Fly Ash, Blast Slag, Silica Fume	
	Content (%) 10	
Chemical admixture	Type Polycarboxylate-based SP, low-viscosity type SP	
	Dosage (%) 0.4, 0.8, 1.2	
Test	Modified-mini slump Channel Flow (yield stress, viscosity)	

2.2 사용 재료 및 시험 방법

본 연구에서는 시멘트 페이스트 및 모르타르 상태에서 실험을 실시하였다. 시멘트는 보통포틀랜드시멘트를 사용하였고 치환분체의 플라이애시, 고로슬래그, 실리카흄을 경우 일반적으로 콘크리트 제조 시 사용되는 제품을 사용하였다. 잔골재는 쇄석 잔골재를 사용하였다. 화학혼화제로 고성능 감수제는 폴리칼복실계이며 일반적으로 레미콘에서 사용되는 제품을 사용하였으며 저점도형 고성능 감수제도 폴리칼복실계를 사용하였다. 다만, 저점도형 고성능 감수제의 경우 아직 대중적으로 구매할 수 없으므로 제조처에서 일반적인 조건으로 제조된 제품을 사용하였다. 화학혼화제의 물리적 특성은 Table 3에 나타내었다. 시멘트 페이스트 및 모르타르는 모두 5 리터 믹서기를 사용하여 비빔을 실시하였으며 비빔 순서는 KS L 5109에 따랐다. 실험실 실내조건은 온 $20 \pm 2^\circ\text{C}$, 습도 $60 \pm 10\%$ 에 진행되었다. 시멘트 페이스트와 모르타르의 유동성을 측정하기 위해 플로시험을 시행하였고 시험방법은 감수제를 사용하는 고유동 특성을 가지고 있으므로 KS L5109 방법에서 드롭테이블을 사용하지 않고 아크릴판에서 플로 시험용 슬럼프 콘을 들어 올려 시험하였다. 시멘트 페이스트의 항복응력 및 소성점도를 측정하기 위해 레오미터를 이용하여 플로커브를 도출하였으며 식 (1)의 빙험모델을 통해 항복응력 및 소성점도를 산출하였다. 이 때, 플로커브를 얻기 위한 전단변형율 (shear rate)은 5s^{-1} 에서 25s^{-1} 까지 매 5s^{-1} 단계에서 계단형식으로 구간마다 15초간 유지시켰다. 이러한 레올로지 시험에서 가한 전단변형율의 형태를 Figure 1에 나타내었다.

모르타르의 경우는 시멘트 페이스트와 다르게 잔골재가 있으므로 시멘트 페이스트용 레오미터로는 레올로지 거동

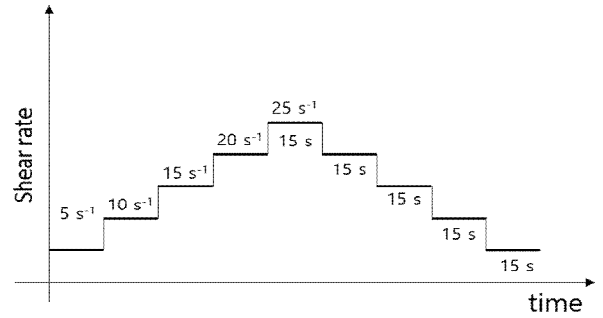


Figure 1. Applied shear rate protocol for flow curve

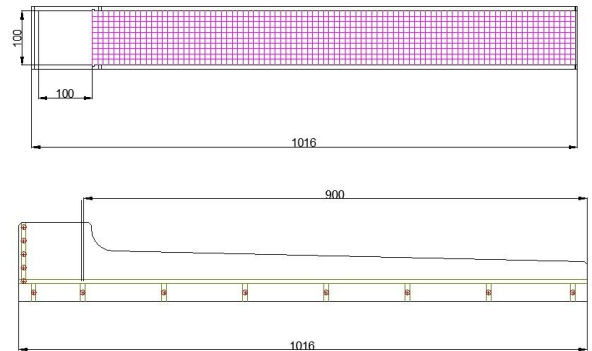


Figure 2. Dimension of channel flow apparatus

측정이 곤란하다. 이에 모르타르의 레올로지 거동을 측정하기 위하여 Shim et al.[13]이 제안하는 채널플로방식을 활용하여 소정의 계산식을 활용하여 모르타르의 항복응력 및 소성점도의 값을 측정하였다. 채널플로의 경우 Figure 2에 보이는 채널을 활용하여 모르타르의 자중에 의해 흘러가는 시간 및 거리를 측정하고 이를 소정의 수식을 사용하여 계산한다. 먼저, 모르타르가 흐르기 시작하여 유동을 멈출 때까지의 거리(C_f)와 유동이 정지될 때까지의 시간(T_f) 값에 대하여 Table 4의 상수를 활용하여 항복응력의 경우 식 (2)과 소성점도의 경우 식 (3)을 사용한다. 식 (3)을 위한 매개변수 a 와 b 는 식 (4), (5)를 활용한다.

$$\tau = \tau_y + \eta \dot{\gamma} \quad \text{-----} \quad (1)$$

$$\tau_y = k_1 \exp(-C_f/k_2) \quad \text{-----} \quad (2)$$

$$\eta_p = \exp\left(\frac{T_f - b}{a}\right) \quad \text{-----} \quad (3)$$

$$a = -k_3 \ln(\tau_y/k_4) \quad \text{-----} \quad (4)$$

$$b = k_5 \exp(-\tau_y/k_6) \quad \text{-----} \quad (5)$$

Table 3. Physical properties of superplasticizer

Type	Phase	Color	main component	Specific gravity	Solid content	pH
Generic type	liquid	Brown	polycarboxylate	1.048	20	5.4
Low viscosity type	liquid	Transparency	polycarboxylate	1.200	38	6.5

Table 4. Coefficients for the correlating model

k_1 (Pa)	k_2 (mm)	k_3 (s)	k_4 (Pa)	k_5 (s)	k_6 (Pa)
729	126	3.0	1568	46.1	11.6

여기서, τ 와 τ_y 는 각각 전단응력과 항복응력을 의미하고 η 는 소성점도, $\dot{\gamma}$ 는 전단변형율을 의미한다.

채널 플로의 경우 모르타르가 흐르지 않거나 일정거리를 넘길 경우 항복응력 및 소성점도의 값이 구하기 어려운 단점을 가진다. 그러므로 본 연구의 경우는 모르타르 감수제 0%의 항복응력과 소성점도의 값은 제외한 후 실험을 진행하였다. 또한, 레오미터로 측정된 레올로지 정수와 채널플로로 측정된 레올로지 정수는 동일한 빙험모델에 기인하는 레올로지 정수이지만, 본 연구 범위에서는 두 시험방법에 대한 연계성을 검토하지 않았으므로 상호 비교하지 않는 것으로 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 감수제 종류에 따른 유동성 및 레올로지 특성 변화

3.1.1 플로

고성능 감수제 및 저점도형 고성능 감수제를 함유하였을 때 시멘트 페이스트와 모르타르 유동성을 비교하기 위해 플로를 측정된 결과는 Figure 3에 나타내었다. 플로 결과에 따르면, 일반형이나 저점도형 모두 고성능 감수제의 함유량이 증가 할수록 플로는 증진되는 것을 볼 수 있다. 시멘트 페이스트와 모르타르 모두 고성능 감수제 0.2% 혼입량에서는 동일한 수준의 플로치를 보이고 있으나 그 이상의 혼입량에서는 저점도형 고성능 감수제를 혼입한 시멘트 페이스트 및 모르타르에서 각각 최대 약 16%에서 23% 정도 높은 플로 수준을 보이고 있었다. 이를 통해 저점도형 고성능 감수제가 일반형 고성능 감수제에 비교하여 보다 높은 유동성 증진효과를 보인다고 할 수 있다. 다만, 시멘트 페이스트와 모르타르를 비교할 때, 시멘트 페이스트의 경우 일반형 고성능 감수제와 저점도형 고성능 감수제의 유동성 증진 효과 차이가 모르타르의 경우보다 작은 것을 볼 수 있었다. 이를 통해 저점도형 고성능 감수제가 모르타르의 경우에 보다 유동성 증진 효과를 높게 발휘하는 것으로 판단되며 잔골재의 존재여부가 이러한 차이에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 그러나 일반형 고성능 감수제의 경우 함유량 1%를 기준으로 그보다 높은 함유량에서는 시멘트 페이스트에서 재료분리현상이 관찰되었다. 반면, 저점도형 고성능 감수제에서는 이보다 낮은 함유량인 0.8%를 기준으로 이후로 재료분리 현상이 관찰되었다. 즉, 저점도형 고성능 감수

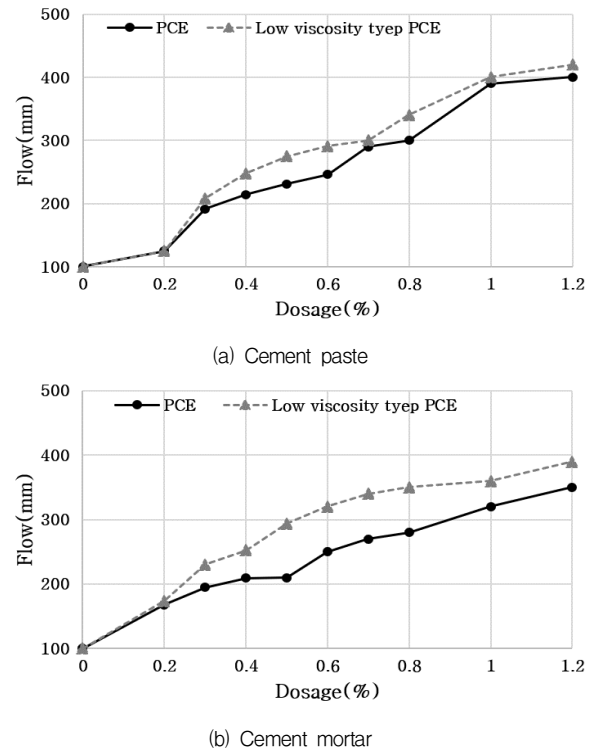
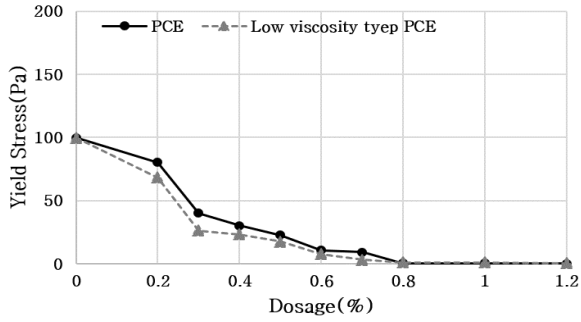


Figure 3. Influence of admixture dosage on flow depending on different types of superplasticizer

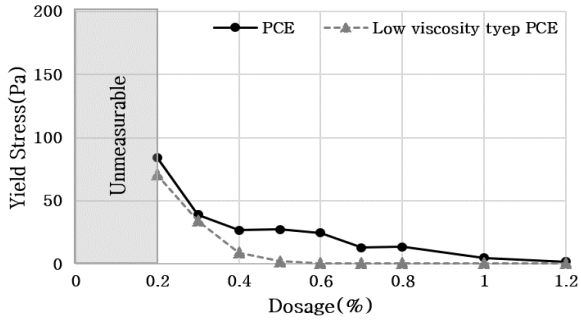
제가 일반형 고성능 감수제와 비교하여 유동성 증진효과가 있으나 이는 재료분리를 쉽게 일으킬 수 있는 요인으로 작용할 가능성이 있음을 알 수 있었다. 또한, 플로 시험과정에서 발생한 재료분리이므로 이러한 경우에는 재료의 소성점도가 낮아진 이유라고 생각할 수 있어 이후 레올로지 측정 결과를 분석해야 할 필요가 있다. 모르타르의 경우에도 재료분리는 동일한 혼입량 수준에서 관찰되었다.

3.1.2 항복응력

플로 시험의 결과는 레올로지 측정에서 항복응력 측정 결과와 관련이 있다고 알려져 있다[14]. 일반형 고성능 감수제와 저점도형 고성능 감수제 사용량에 따른 시멘트 페이스트 및 모르타르의 항복응력 시험결과를 Figure 4에 나타내었다. 항복응력 결과는 플로 결과와 동일하게 고성능 감수제 혼입량과 비례해서 낮아지는 형태를 보였다. 일반형 고성능 감수제와 비교하였을 때, 저점도형 고성능 감수제의 경우 시멘트 페이스트의 경우 최대 약 50%의 높은 항복응력 저감효과를 보였다. 이는 저점도형 고성능 감수제가 점도만을 저감시키는 것이 아니라 항복응력을 동시에 저감시키는 효과가 있음을 보여주는 결과이다. 또한, 재료의



(a) Cement paste



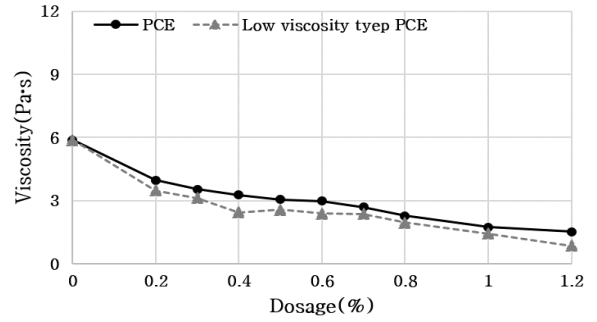
(b) Cement mortar

Figure 4. Influence of admixture dosage on yield stress depending on different types of superplasticizer

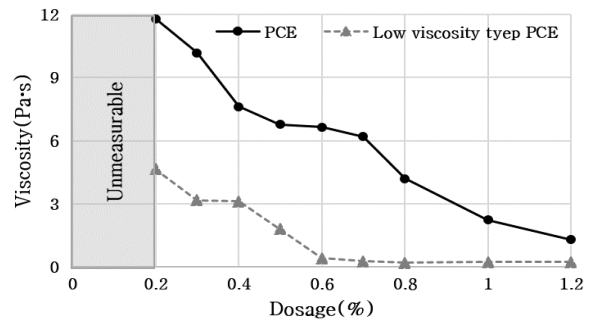
특성에서 고형분량이 저점도형 고성능 감수제가 더 높은 것에 기인하여 저점도형 고성능 감수제의 분산성능이 더 높은 것으로 생각된다.

3.1.3 소성점도

일반적으로 고성능 감수제는 분산작용을 하는 혼화재료이므로 시멘트 계열 재료에 사용하였을 때, 항복응력을 저감시키는 효과는 있지만 소성점도를 저감시키는 능력은 상대적으로 낮다고 알려져 있다. Wallevik and Wallevik [11] 등의 연구에서도 고성능 감수제의 경우 항복응력만을 저감시킨다고 보고하고 있다. 하지만, 실무 상황에서 고성능 감수제의 사용이 과다한 경우에 재료분리가 발생하는 등 소성점도를 저감시키는 역할도 있는 것으로 보이며 이는 시멘트 계열 재료의 분산과정에서 시멘트 입자사이의 간혀 있는 자유수를 배출시키기 때문으로 판단되고 있다. 저점도형 고성능 감수제는 기본적으로 분산성능을 갖는 혼화재료이기 때문에 소성점도의 저감은 활발한 분산성능에 기인하는 것으로 판단되지만, 여전히 소성점도 저감효과를 평가해볼 필요는 있다. 이에 일반형 고성능 감수제와 비교한 저점도형 고성능 감수제 사용량에 따른 소성점도 저감효과



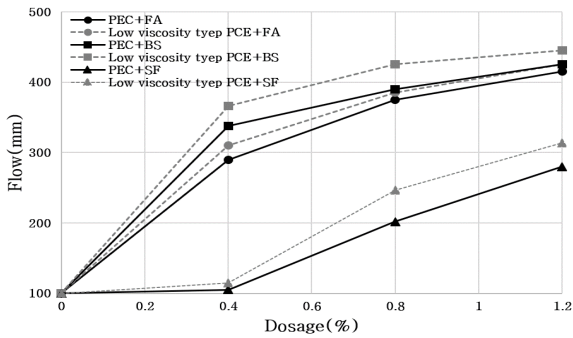
(a) Cement paste



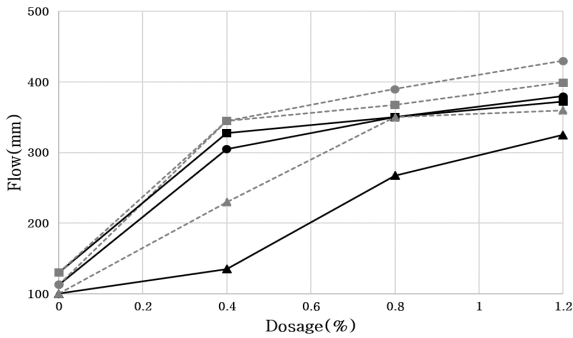
(b) Cement mortar

Figure 5. Influence of admixture dosage on plastic viscosity depending on different types of superplasticizer

를 Figure 5에 나타내었다. 감수제를 사용하였을 경우의 정전기적 반발력에 의해 항복응력에 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 하지만 저점도형 고성능 감수제의 경우 점도를 낮추는 역할을 하기 때 문에 이를 확인하기 위해 고성능 감수제 및 저점도형 고성능 감수제를 사용한 시멘트 페이스트 및 모르타르의 소성점도는 Figure 4에 나타내었다. 시멘트 페이스트와 모르타르 모두 고성능 감수제를 사용함에 따라 소성점도가 저감하였는데, 이를 통해 고성능 감수제가 항복응력만을 저감하고 소성점도를 변화시키지 않는 것은 아니라는 것을 알 수 있었다. 특히, 저점도형 고성능 감수제의 경우 일반형 고성능 감수제와 비교하여 소성점도를 전반적으로 더 큰 폭으로 저감시키는 성능을 볼 수 있었다. 특히, 모르타르의 경우 저점도형 고성능 감수제가 0.8% 사용한 경우에 일반형 고성능 감수제와 비교하여 60% 크게 소성점도를 저감하여 0에 가까운 수준으로 수렴되었는데, 이는 재료분리가 관찰된 시점과 일치한다. 다만, 시멘트 페이스트의 경우 및 일반형 고성능 감수제를 사용한 경우의 재료분리 시점과 소성점도와 관련성은 재료분리가 발생하지 않아 찾기 어려웠다.



(a) Cement paste



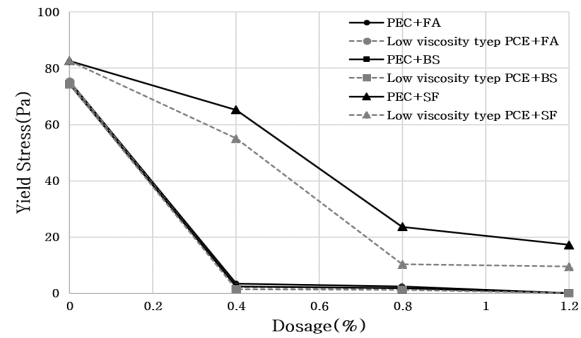
(b) Cement mortar

Figure 6. Influence of admixture dosage on flow depending on different types of superplasticizer

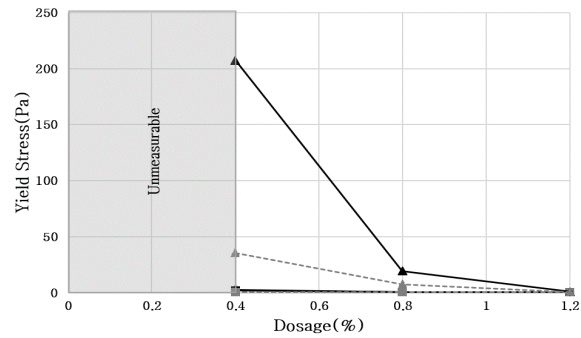
3.2 혼화재료를 포함한 경우 감수제 종류에 따른 유동성 및 레올로지 특성 변화

3.2.1 플로

플라이애시, 고로슬래그 및 실리카흙을 치환한 상황에서 고성능 감수제 및 저점도형 고성능 감수제를 사용한 시멘트 페이스트 및 모르타르상태에서 측정된 플로 결과를 Figure 6에 나타내었다. 전체적으로 고성능 감수제 사용량이 증가함에 따라 플로치가 증가하는 형태를 보이고 있음을 알 수 있었다. 먼저, 시멘트 페이스트에 있어서 혼화재료별 플로치의 변화는 고로슬래그의 경우 가장 높은 플로치를 보이고 실리카흙의 경우는 가장 낮은 수준의 플로치를 보였다. 감수제 종류에 따른 플로치 증진효과는 저점도형 고성능 감수제의 경우에 일반 고성능 감수제보다 플로를 더욱 증가시키는 경향을 보이고 있어, 저점도형임에도 불구하고 플로치를 증진시키는 데에도 기여함을 알 수 있었다. 다만, 저점도형 고성능 감수제와 일반형 고성능 감수제의 플로치 증진 정도 차이에 있어서 고로슬래그와 실리카흙 치환 시 차이보다 플라이애시를 치환한 페이스트에서 차이가 더 적게 나타났는데, 이는 플라이애시의 구형입자가 점성을 저감[15]하



(a) Cement paste



(b) Cement mortar

Figure 7. Influence of admixture dosage on yield stress depending on different types of superplasticizer

는 데에 따라 저점도형 고성능 감수제의 성능 발현효과가 플라이애시 치환의 경우 다소 저감되는 것으로 판단된다. 모르타르의 경우도 플로치의 변화는 전반적으로 시멘트 페이스트의 경우와 유사하였다. 다만, 모르타르의 경우에는 플라이애시의 경우가 더욱 유동성이 양호하게 나타났는데, 이는 소성점도 저감이 플로치 증진에 영향을 미치는 것으로 생각된다[16]. 또한, 실리카흙을 치환한 모르타르의 경우에 저점도형 고성능 감수제의 성능 발현 정도가 매우 큰 것을 알 수 있는데, 이를 통해서 저점도형 고성능 감수제의 점도 저감 효과가 미립분을 많이 포함하여 소성점도를 크게 하는 실리카흙에 있어서 크게 작용하는 것으로 판단할 수 있다.

3.2.2 항복응력

플라이애시, 고로슬래그, 그리고 실리카흙을 치환한 시멘트 페이스트 및 모르타르에 대하여 저점도형 고성능 감수제와 일반형 고성능 감수제를 사용한 경우에 항복응력을 측정하여 Figure 7에 나타내었다. 항복응력의 결과는 플로 결과와 유사한 경향을 보이며 고성능 감수제 종류에 관계없이 혼입량 증가에 따라 항복응력이 감소하는 경향을 보였

다. 다만, 항복응력의 경우 고로슬래그와 플라이애시의 차이가 크지 않았으며 이 경우에 저점도형 고성능 감수제와 일반형 고성능 감수제와의 차이도 크지 않았다. 다만, 실리카흙의 경우는 저점도형 고성능 감수제를 사용하는 경우에 일반형 고성능 감수제를 사용한 경우보다 항복응력 저감정도가 페이스트의 경우에 약 7Pa정도, 모르타르의 경우 최대 약 150Pa 정도 차이가 발생하였다. 이를 통해 실리카흙을 치환한 고성능 콘크리트 배합에 있어서 일반형 고성능 감수제보다 저점도형 고성능 감수제를 사용할 경우에 동일한 혼입량으로 보다 높은 유동성 증진 효과를 확보할 수 있을 것으로 판단되었다. 다만, 플라이애시와 고로슬래그를 치환한 경우에는 혼입량 0.4%에서부터 항복응력이 0에 가깝게 수렴하여 본 연구에서 사용된 배합조건에서는 더 이상의 항복응력 저감효과를 관찰할 수는 없었다.

3.2.3 소성점도

혼화재료를 치환한 시멘트 페이스트 및 모르타르에 대하여 저점도형 고성능 감수제와 일반형 고성능 감수제를 사용한 경우에 소성점도를 측정할 결과를 Figure 8에 나타내었다. 먼저, 주목할 만한 부분은 모든 경우에서 고성능 감수제의 종류에 상관없이 고성능 감수제 사용을 통해 소성점도가 저감되었다는 것이다. 즉, Wallevik and Wallevik[11]의 실험결과와 다르게 일반적인 고성능 감수제를 사용함에도 소성점도는 저감된다는 결과로써 이는 고성능 감수제의 분산 작용에 의해 간혀 있는 자유수가 빠져나와 점도저감에 일조하는 것으로 생각할 수 있다. 또한, 이러한 현상은 실질적으로 고성능 감수제 과다사용 시 재료분리현상이 발생할 수 있다는 점으로 연관시켜 생각할 수 있는 부분이다. 먼저, 시멘트 페이스트의 경우에는 실리카흙을 치환한 경우에 가장 높은 수준의 소성점도를 보이고 있으며 고로슬래그와 플라이애시가 유사한 수준의 소성점도를 보이고 있었다. 저점도형 고성능 감수제는 일반형 고성능 감수제와 비교하여 소성점도를 저감시키는 효과가 있는 것으로 나타났으며 특히, 실리카흙을 치환한 시멘트 페이스트에 있어서 이미 높은 수준의 소성점도를 저감시키는 효과를 관찰할 수 있었다. 고로슬래그와 플라이애시의 경우에는 고로슬래그의 경우에 고성능 감수제의 사용량이 0.4%의 경우에 이미 약 2Pas 수준의 소성점도로 저하하였으며 이후 고성능 감수제의 종류에 상관없이 고성능 감수제의 사용량이 증가하더라도 소성점도가 크게 변화하지는 않았다. 반면, 플라이애

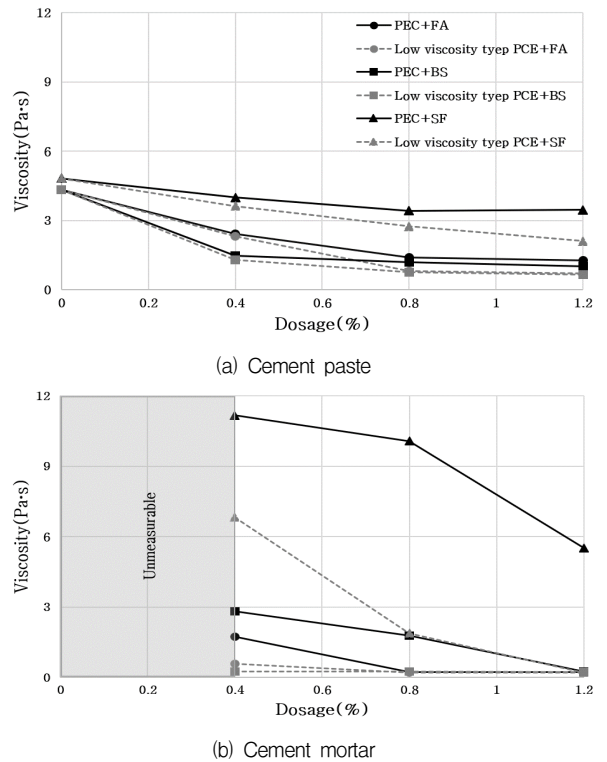


Figure 8. Influence of admixture dosage on plastic viscosity depending on different types of superplasticizer

시의 경우는 고성능 감수제 사용량 0.8% 이상에서 소성점도가 수렴하는 경향을 나타내었다. 모르타르의 경우에는 치환재료를 따라 소성점도 값이 매우 큰 폭으로 차이를 보였다. 즉, 실리카흙을 치환한 경우는 시멘트 페이스트의 경우보다 높은 수준의 소성점도로 측정되었으나 고로슬래그와 플라이애시를 치환한 경우에는 시멘트 페이스트의 경우보다 낮은 수준의 소성점도를 보였다. 이러한 시멘트 페이스트 상태의 소성점도와 모르타르 상태의 소성점도를 직접적으로 비교하는 것은 측정방법이 상이하여 다소 무리가 있을 수는 있으나, 이론적으로 입자크기가 큰 잔골재를 포함하는 경우에 소성점도가 저감되는 것이 일반적이라는 견지에서 보았을 때, 실리카흙을 포함하는 경우에 페이스트의 소성점도가 매우 높아져 잔골재를 강하게 구속하는 형태를 생각할 수 있다. 모르타르의 경우는 고로슬래그와 플라이애시의 경우는 이미 소성점도가 매우 낮은 값을 보였기 때문에 저점도형 고성능 감수제를 사용하는 경우에 0.4% 감수제 사용량에서 이미 소성점도가 수렴하는 결과를 보였다. 실리카흙을 치환한 모르타르의 경우에는 매우 큰 폭으로 소성점도 저감효과를 나타내었는데, 시멘트 페이스트와 비교하여 높은 소성점도치를 나타내었던 0.4% 고성능 감

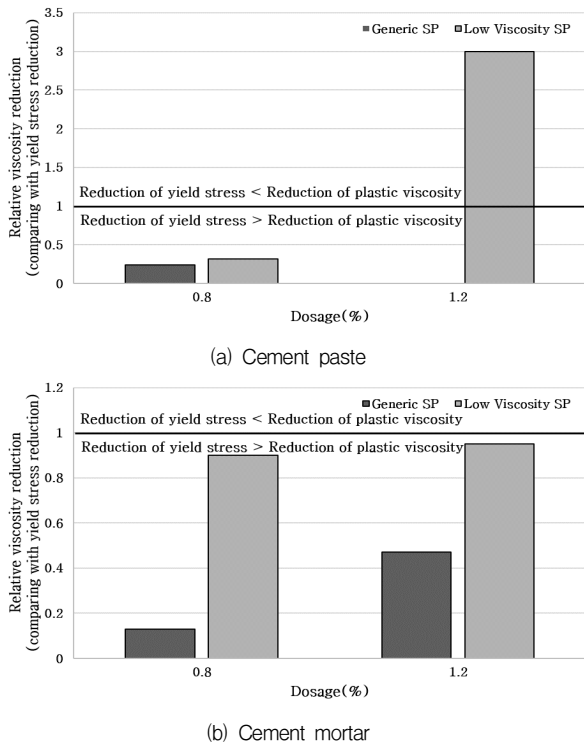


Figure 9. Influence of admixture dosage on relative viscosity reduction comparing with yield stress reduction (for mixtures incorporating silica fume)

수제 사용량과 비교하여 0.8%의 경우 저점도형 고성능 감수제는 오히려 시멘트 페이스트보다 낮은 수준의 소성점도를 보였다. 이를 통해 저점도형 고성능 감수제가 실리카흙을 포함하는 매우 소성점도가 높은 페이스트의 소성점도를 낮춤으로써 잔골재를 구속하는 능력을 저감시키는 것을 알 수 있었으며 특히, 이러한 역할에 기인하여 저점도형 고성능 감수제를 과다하게 사용하는 경우에는 재료분리가 발생할 우려가 있음을 생각할 수 있다. 다만, 본 연구에서는 재료분리가 발생하지는 않았다.

다음의 Figure 9은 실리카흙을 포함하는 경우에 시멘트 페이스트와 모르타르의 소성점도 저하비율을 나타낸 것이다. 플라이애시와 고로슬래그의 경우는 이미 소성점도가 많이 낮아서 소성점도 저감 효과를 뚜렷이 분석하기 어렵고, 실리카흙의 경우는 소성점도가 높아 저점도형 고성능 감수제의 소성점도 저감효과를 쉽게 분석할 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이, 1을 기준을 1보다 높은 숫자는 감수제가 항복응력보다 소성점도를 상대적으로 많이 저감하는 것이고, 1보다 낮은 숫자는 감수제가 항복응력을 상대적으로 많이 저감하는 경우이다. 먼저, 페이스트의 경우는 감수

제 첨가량 0.8%의 경우에 일반형과 저점도형이 모두 항복응력을 상대적으로 더 많이 저감시켰지만, 첨가량 1.2%에서 일반형 고성능 감수제는 소성점도 저감이 없었던 반면, 저점도형 고성능 감수제는 상대적으로 소성점도를 크게 저감시켰다. 모르타르의 경우, 전체적으로 항복응력을 상대적으로 크게 저감시키는 것으로 나타났으나, 모든 고성능 감수제 사용량에 있어서 저점도형 고성능 감수제가 일반형 고성능 감수제 보다 소성점도 저감 정도가 큰 것으로 나타났다. 이를 통해, 저점도형 고성능 감수제가 소성점도를 저감시키는 능력이 일반형 고성능 감수제와 비교하여 큰 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 저점도형 고성능 감수제가 혼화재료를 포함하는 시멘트 계열 재료의 유동성 및 레올로지 특성에 미치는 영향을 파악하기 위해 일련의 실험을 실시하였다. 플라이애시, 고로슬래그, 및 실리카흙을 치환한 시멘트 페이스트 및 모르타르에 대하여 일반적인 고성능 감수제와 저점도형 고성능 감수제가 사용되었고, 이에 대해 플로, 레올로지 거동을 측정하였다. 시멘트 페이스트와 모르타르에 있어서 유의미하게 다른 결과를 보이지는 않았고 고성능 감수제의 종류에 따라 다른 유동성 증진효과가 나타났고, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 플로로 측정되는 유동성에서 혼화재료를 사용하지 않은 경우에 저점도형 고성능 감수제는 일반형 고성능 감수제 보다 유동성 증진효과가 높게 나타났다. 특히, 시멘트 페이스트와 모르타르를 비교한 결과에서는 모르타르의 경우에 더 큰 유동성 증진효과를 보였다.
- 2) 항복응력에 있어서 저점도형 고성능 감수제의 항복응력 저감효과는 모르타르의 경우에 더 크게 나타났으며 소성점도에서도 저점도형 고성능 감수제가 일반형 고성능 감수제 보다 큰 소성점도 저감효과를 나타내었다.
- 3) 혼화재료를 사용한 배합에 있어서 플로로 측정되는 유동성 저감효과는 시멘트 단독 사용과 유사하게 저점도형 고성능 감수제가 유동성 증진효과가 일반형 고성능 감수제 보다 큰 것으로 나타났으며 특히, 실리카흙을 사용한 배합에 대해 유동성 증진효과가 크게 나타났다.

- 4) 항복응력의 경우는 일반형 고성능 감수제 및 저점도형 고성능 감수제를 사용한 경우에 혼화재료를 사용한 배합에서 모두 항복응력을 크게 저감시켰는데, 실리카흄을 치환한 경우에 대해 일반형 고성능 감수제에 비해 저점도형 고성능 감수제의 항복응력 저감효과가 우수한 것을 확인할 수 있었다. 특히, 이러한 효과는 시멘트 페이스트보다 모르타르에서 크게 나타났다.
- 5) 소성점도에 있어서 저점도형 고성능 감수제의 소성점도 저감효과는 일반형 고성능 감수제에 비해 크게 나타났다. 특히, 실리카흄에 대해 그 성능을 크게 확인할 수 있었으며 모르타르 배합에 있어서는 실리카흄을 포함한 배합에서 소성점도 저감 효과가 가장 크게 나타났다.
- 6) 저점도형 고성능 감수제는 항복응력과 소성점도를 동시에 저감시키는 효과가 있었으며 일반형 고성능 감수제와 비교하여 소성점도를 더욱 크게 저감시키는 효과가 있었다. 이러한 저감효과는 실리카흄의 경우, 모르타르 배합에서 더욱 크게 확인할 수 있었다.

요 약

본 연구의 목적은 저점도형 고성능 감수제가 혼화재료를 포함하는 시멘트 계열 재료의 유동성 및 레올로지 특성에 미치는 영향을 분석하여 기초적인 정보를 제공하는 것이다. 이에 플라이애시, 고로슬래그, 실리카흄을 치환한 시멘트 페이스트와 모르타르에 대하여 일반적인 고성능 감수제와 저점도형 고성능 감수제를 사용하여 실험을 실시하였다. 실험 결과 저점도형 고성능 감수제는 소성점도에 있어서 일반형 고성능 감수제보다 크게 저감시키는 것으로 나타났다. 이러한 결과를 바탕으로 본 연구가 향후 저점도형 고성능 감수제를 사용하는 데에 기초적인 데이터를 제공할 것으로 기대한다.

키워드 : 레올로지, 소성점도, 항복응력, 저점도형 고성능 감수제, 혼화재료

Acknowledgement

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research

Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science, ICT & Ruture Planning (NRF-2015 R1C1A1A02036892)

ORCID

Bae-Geun Son, <http://orcid.org/0000-0001-7989-3531>

Hyang-Seon Lee, <http://orcid.org/0000-0002-9134-5842>

You-Jeong Lee, <http://orcid.org/0000-0002-6945-1278>

Dong Yeop Han, <http://orcid.org/0000-0003-0918-0530>

References

1. Yang KH, Lee YH. An experimental study on workability for practical use of high-performance concrete. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 2003 Mar;3(1):139-46.
<https://doi.org/10.5345/JKIC.2003.3.1.139>
2. Seo i, Lee JW, Park HG, Bae YK, Cho SH, Lee HS. A study on properties of ultra high strength concrete of above 100MPa—fluidity and rheology properties. *Journal of the Korea Concrete Institute*. 2008 Nov;20(2):317-20.
3. Park SB, Yoon ES. An experimental study on the mechanical properties of silica fume and fly ash cement composites. *Journal of the Korea Concrete Institute*. 1994 Oct;06(5):158-70.
4. Neville AM. *Properties of concrete*. Fourth Edition. New York: J. Wiley; 1995. 844 p.
5. Sidney M, Youg JF. *Concrete—Second Edition*. NJ : Pearson Education, Inc; c2003. Chapter 9, Fresh state concrete; p. 566-83.
6. Coussot P. *Rheometry of pastes, suspensions, and granular materials*. New Jersey: A John Wiley & Sons. 2005. 304 p.
7. Nehdi M, Mindess S, Aitcin P. Rheology of high performance concrete: effect of ultrafine particles. *Cement and Concrete Research*. 1998;28(5):687-97.
8. Cho HY, Suh JM, Jeon KS, Lee KH, Kim JM. Effect of the polycarboxylates on the physical properties of cement materials. *Journal of the Korea concrete institute*. 2011 Aug;13(4):354-61.
9. Mindess S, Young J, Darwin D. *Concrete*, 2nd ed. New Jersey: Prentice Hall; 2002. 644 p.
10. Uchikawa H, Hanehara S, Sawaki D. The role of steric repulsive force in the dispersion of cement particles in fresh paste prepared with organic admixture. *Cement and Concrete Research*. 1997 Jan;27(1):37-50.

- [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(96\)00207-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(96)00207-4)
11. Wallevik O, Wallevik J. Rheology as a tool in concrete science: the use of rheographs and workability boxes. *Cement and Concrete Research*. 2011 Dec;41(12):1279–88.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.01.009>
 12. Kuder k, Ozyurt N, Mu EB, Shah SP. Rheology of fiber-reinforced cementitious materials. *Cement and Concrete Research*. 2007 Feb;37(2):191–9.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.10.015>
 13. Shim TY, Lee JH, Kim JH, Kim MK. Correlation between channel-flow test results and rheological properties of freshly mixed mortar. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*. 2016 Jul;17(7):237–44.
<https://doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.7.237>
 14. Song JT, Park HS, Byun SH, Yoo DW. Rheological properties of cement paste blended blast furnace slag or fly ash powder. *Journal of the Korea Ceramic Society*. 2008 Jun;45(6):336–44.
<https://doi.org/10.4191/KCERS.2008.45.6.336>
 15. Nam JH, Son GH, Hong YT, OH SG. Analysis of the properties of high-flowability concrete using admixture. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*. 2005 Nov;5(1):459–64.
 16. Park SJ, Kim KM, Sho KH. Effect of particle size distribution of binder on the fluidity of high flowing concrete. *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*. 2009 Aug;25(8):167–74.